

基于六边形的双芯光子晶体光纤偏振分束器

张怡,葛海波*,吴昊,安文喆

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710121)

摘要:为了得到短长度、高消光比的偏振分束器,设计了一种基质为二氧化硅的六边形双芯光子晶体光纤(PCF)偏振分束器,利用全矢量有限元法和模式耦合理论对偏振分束器的耦合长度、耦合长度比、消光比和带宽进行了数值分析。研究结果表明:在波长 1550 nm 处,偏振分束器的长度为 103.05 μm ,消光比高达 117.78 dB,消光比大于 20 dB 的带宽为 100 nm,覆盖了整个 C 波段以及 S 和 L 的大部分波段。

关键词:光子晶体光纤;偏振分束器;有限元法;耦合长度;消光比

中图分类号:TN919 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)10-0053-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dual-core photonic crystal fiber polarization splitter based on hexagon

ZHANG Yi, GE Haibo*, WU Hao, AN Wenzhe

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to obtain a short-length polarizing beam splitter with a high extinction ratio, a hexagonal dual-core photonic crystal fiber (PCF) polarizing beam splitter based on SiO_2 is designed. The polarizing beam splitting is performed using the full vector finite element method and mode coupling theory. The coupling length, coupling length ratio, extinction ratio and bandwidth of the filter were numerically analyzed. The research results show that at a wavelength of 1.55 μm , the length of the polarization beam splitter is 103.05 μm , the extinction ratio is as high as 117.78 dB, and the bandwidth of the extinction ratio is greater than 20 dB is 100 nm, covering the entire C-band and most of the S and L bands.

Key words: photonic crystal fiber; polarization beam splitter; finite element; coupling length; extinction ratio

0 引言

随着光通信技术的不断发展,高速度、大容量的全光网络^[1]需要性能更加优越的光学器件的支持。偏振分束器^[2-3]作为光学系统中一个重要的组成部分,它的作用是将一束光分离成正交的两束偏振光。传统单模光纤^[4-5]的偏振分束器长度长、消光比较低,已经不能满足高性能光学应用系统的需要,因此设计超短长

度、高消光比和宽带宽等性能优良的偏振分束器就显得尤为重要。由于光子晶体光纤(PCF)^[6]独特的光学特性,诸如无截止的单模传输特性^[7]、高双折射特性^[8]、高非线性^[9]、低损耗特性^[10]及色散可调^[11]等,使得基于 PCF 的偏振分束器引起了广大学者的研究兴趣,目前已经有各种结构的 PCF 偏振分束器被报道。2013 年,韩博琳等人^[12]利用全矢量有限元法,设计了一种新型超宽带的 PCF 偏振分束器,消光比高于 20 dB 的带宽达到 600 nm,其长度为 7.362 mm。2014 年,Sheng Z 等人^[13]设计的双椭圆 PCF 偏振分束器长度短至 0.775 μm ,消光比达到了 50 dB,大于 20 dB 的带宽为 32 nm。2015 年,曹晔等人^[14]设计的基于碲酸盐的包层为六边形的单芯 PCF 偏振分束器长度为 15 mm,在 1550 nm 处的消光比为 -40.2 dB,小于 -20 dB 的带宽为 67.1 nm。同年,李绪友等人^[15]利用全矢量有限元法设计了一种纤芯掺杂低折射率材料的双芯 PCF,其长度只有 0.58 mm,消光

收稿日期:2020-02-13。

基金项目:陕西省教育厅自然科学基金项目(2011JM8038)资助;陕西省重点产业链(群)项目(S2019-YF-ZDCXL-ZDLGY-0098)资助。

作者简介:张怡(1995—),女,陕西西安人,硕士研究生,现就读于西安邮电大学电子工程学院光学工程专业,主要从事光信息传输技术的研究工作。参与了西安邮电大学研究生创新基金重点项目 1 项;参加了第四届“互联网+”大学生创新创业大赛,获得校赛二等奖。

*通信作者:葛海波(E-mail: gehaibo2417@aliyun.com)。



比高达 82.33 dB,高于 20 dB 的带宽为 70 nm。2016 年,刘兆伦等人^[6]设计的全固态三芯 PCF 偏振分束器在波长 1.55 μm 处的消光比高达 -101.27 dB,小于 -20 dB 的带宽为 100 nm,长度为 1.14 mm。2017 年,Rajeswari D 等人^[7]利用有限元法设计了长度为 2 mm、消光比为 -52.5 dB 和带宽达到 100 nm 的双芯 PCF 偏振分束器;同年,HE F 等人^[8]设计的基于碲酸盐玻璃的具有 5 个椭圆的双芯 PCF 偏振分束器的消光比高达 124.92 dB,带宽达到了 165 nm,长度仅为 105.156 μm 。2019 年,Jegadeesan S 等人^[9]设计的基于二氧化硅的六边形双芯 PCF 偏振分束器长度为 1.9 mm,带宽为 80 nm,消光比为 -34.988 dB。上述这些分束器有消光比高的,长度短的和带宽宽的,但都没有同时达到短长度、高消光比和宽带宽的性能要求。

为了得到性能更加优越的偏振分束器,本文设计背景材料为二氧化硅的六边形双芯 PCF 偏振分束器

1 结构设计和理论分析

1.1 光纤结构设计

本文设计的 PCF 偏振分束器的截面结构如图 1 所示,在六边形包层的中心水平轴上引入一行空气孔,缺失中心椭圆空气孔左右两边的空气孔形成纤芯。为了增加结构的不对称性,其中靠近 2 个纤芯的空气孔也为椭圆形,从而提高分束器的耦合长度。包层圆形空气孔的直径为 d ,空气孔的水平孔间距为 Λ ,中心水平轴空气孔与六边形包层的垂直孔间距为 Λ_y ,中心椭圆 1 长轴为 a_1 ,短轴为 b_1 ;椭圆 2 的长轴为 b_2 ,短轴为 a_2 ,A、B 分别为 2 个纤芯。背景材料为二氧化硅,在波长为 1550 nm 时的折射率为 1.444,空气的折射率为 1。

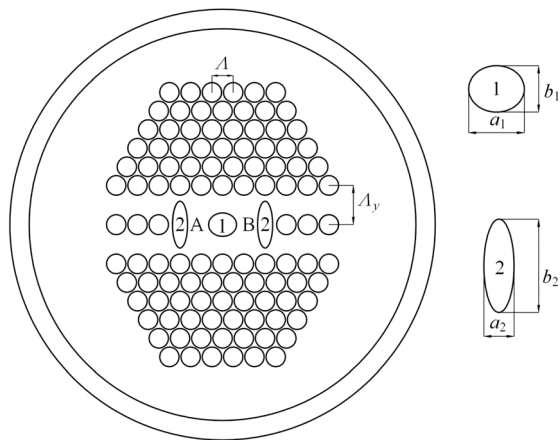


图 1 偏振分束器截面图

1.2 基本理论

基于模式耦合理论为双芯 PCF 中存在 4 种模式,分别是 X 方向的奇模、偶模,Y 方向的奇模、偶模。光波在光纤中传播时,相同偏振方向的模式会发生干涉^[20],从而使得 2 个纤芯之间产生模式耦合。当某一个偏振光的能量从其中一个纤芯转移到另外一个纤芯中时,即该纤芯中的能量从最大值变成最小值,而另外一个纤芯中的能量从最小值变成最大值。此时偏振光在光纤中的传播距离被定义为耦合长度^[21],其表达式如下:

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_{\text{even}}^i - \beta_{\text{odd}}^i} = \frac{\lambda}{2(n_{\text{even}}^i - n_{\text{odd}}^i)} \quad (1)$$

其中, i 为 X 方向或者 Y 方向, β_{even}^i 和 β_{odd}^i 分别为偶模和奇模的传播常数, n_{even}^i 和 n_{odd}^i 分别为偶模和奇模的有效折射率, λ 为波长。

耦合长度比 (CLR)^[22] 可以作为设计偏振分束器的一个参考依据表示为:

$$\text{CLR} = \frac{L_y}{L_x} = \frac{m}{n} \quad (2)$$

其中, m 、 n 为奇偶性相反的整数。当 $\text{CLR}=2$ 或者 $\text{CLR}=\frac{1}{2}$ 时,偏振分束器的性能最佳。

由于设计的分束器长度在微米 (μm) 量级,因此忽略传输损耗。光在某个纤芯中传输距离为 L ,在另外一个纤芯中 2 个偏振光的输出功率可表示为^[23]:

$$P_{\text{out}}^i = P_{\text{in}}^i \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{L}{L_i}\right) \quad (3)$$

其中, P_{in}^i 为入射光功率。为了方便计算,将入射光功率做归一化处理。

消光比^[24] 是衡量偏振分束器性能的一个重要参数,是指光在传输一段距离后,输出端口不同偏振光的分离程度,可表示为:

$$\text{ER} = 10 \lg \frac{P_{\text{out}}^Y}{P_{\text{out}}^X} \quad (4)$$

其中, P_{out}^X 、 P_{out}^Y 分别为 X 和 Y 方向的输出功率。在实际应用中,当 $\text{ER} \geq 20$ dB 或者 $\text{ER} \leq -20$ dB 时,说明 2 束光被很好地分离。

2 偏振分束器的优化设计和性能分析

本文利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件进行数值模拟,可以得到双芯 PCF 偏振分束器的模场

分布图及有效折射率,从而由公式计算得到耦合长度、耦合长度比和消光比。调整结构参数,则可得到最优结构参数。

2.1 结构参数对耦合特性的影响

在空气孔的水平孔间距 Λ 、中心水平轴空气孔与六边形包层的垂直孔间距 Λ_y 以及椭圆 1、椭圆 2 参数保持不变的情况下, d 从 $0.85 \mu\text{m}$ 以 $0.05 \mu\text{m}$ 的步长变化至 $1.1 \mu\text{m}$ 时,耦合长度 (L_x, L_y) 和 CLR 与包层圆形空气孔的直径 d 的关系如图 2 所示。可以看出, X、Y 方向的耦合长度都随着 d 的增加而增加 (主要是因为 d 变大时结构的不对称性会增强,双折射效应增强,纤芯的模场能量减小,纤芯能量的减小大于双折射效应);当 $d=1 \mu\text{m}$ 时,CLR 的值最接近 2。

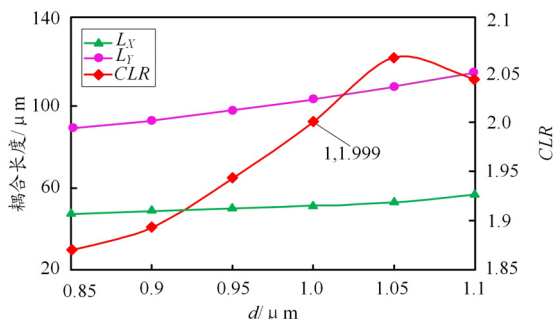


图2 直径 d 对耦合长度和 CLR 的影响

在包层圆形空气孔的直径 d 、中心水平轴空气孔与六边形包层的垂直孔间距 Λ_y 以及椭圆 1、椭圆 2 参数保持不变的情况下, Λ 从 $1.0 \mu\text{m}$ 以 $0.05 \mu\text{m}$ 的步长变化至 $1.25 \mu\text{m}$ 时,耦合长度和 CLR 与 Λ 的关系如图 3 所示。可以看出, X、Y 方向的耦合长度都随着 Λ 的增加而增加 (主要是因为 Λ 变大时包层空气孔之间的间隔增大,不对称性加强),因此 2 个方向的耦合长度随 Λ 的增加而变大;当 $\Lambda=1.1 \mu\text{m}$ 时,CLR 的值最接近 2。

在包层圆形空气孔的直径 d 、空气孔的水平孔间距为 Λ 和椭圆 1、椭圆 2 参数保持不变的情况下, Λ_y 从

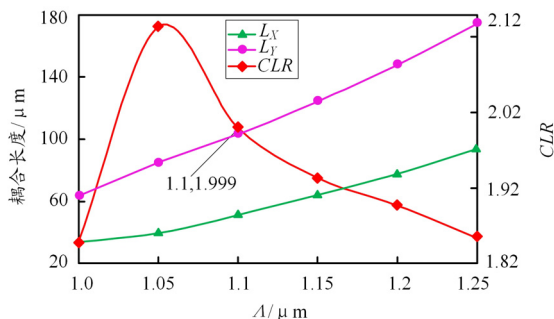


图3 间距 Λ 对耦合长度和 CLR 的影响

$1.7 \mu\text{m}$ 以 $0.1 \mu\text{m}$ 的步长变化至 $2.2 \mu\text{m}$ 时,耦合长度和 CLR 与 Λ_y 的关系如图 4 所示。可以看出, X、Y 方向的耦合长度都随着 Λ_y 的增加而减小 (主要是因为 Λ_y 变大时结构的不对称性加强,双折射效应加强,纤芯的能量减小,纤芯能量的减小小于双折射效应),因此 2 个方向的耦合长度随 Λ_y 的增加而减小;当 $\Lambda_y=2 \mu\text{m}$ 时,CLR 的值最接近 2。

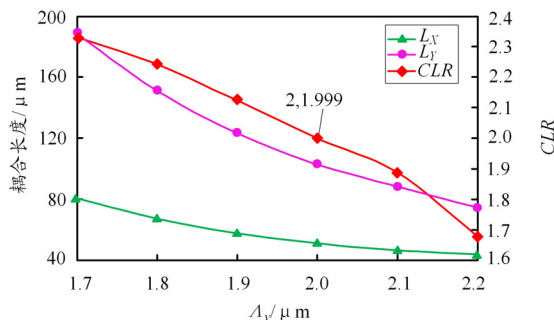
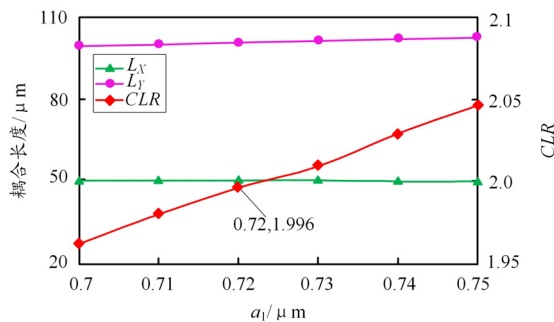
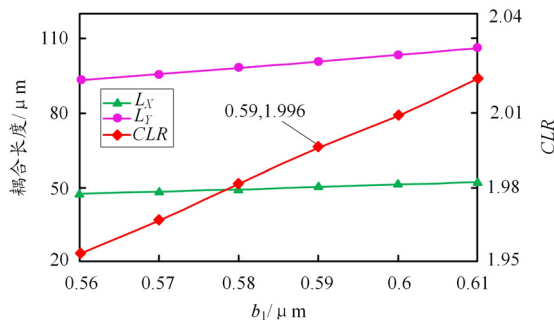


图4 间距 Λ_y 对耦合长度和 CLR 的影响

在包层圆形空气孔的直径 d 、空气孔的水平孔间距 Λ 、中心水平轴空气孔与六边形包层的垂直孔间距 Λ_y 以及椭圆 2 参数保持不变的情况下,椭圆 1 长轴 a_1 、短轴 b_1 和耦合长度与 CLR 的关系如图 5 所示。可以看出, X、Y 方向的耦合长度随着 a_1 的增加而减小,随着 b_1 的增加而增大;当椭圆 1 的长轴 $a_1=0.72 \mu\text{m}$ 、



(a) 长轴 a_1



(b) 短轴 b_1

图5 长轴 a_1 、短轴 b_1 对耦合长度和 CLR 的影响

短轴 $b_1=0.59\ \mu\text{m}$ 时,CLR 的值最接近 2。

在包层圆形空气孔的直径 d 、空气孔的水平孔间距 Λ 、中心水平轴空气孔与六边形包层的垂直孔间距 Λ_y 和椭圆 1 参数保持不变的情况下,椭圆 2 短轴 a_2 、长轴 b_2 与耦合长度和 CLR 的关系如图 6 所示。可以看出,X、Y 方向的耦合长度随着 a_2 、 b_2 的增加而减小;当椭圆 2 的短轴 $a_2=0.39\ \mu\text{m}$ 、长轴 $b_2=1.19\ \mu\text{m}$ 时,CLR 的值最接近 2。

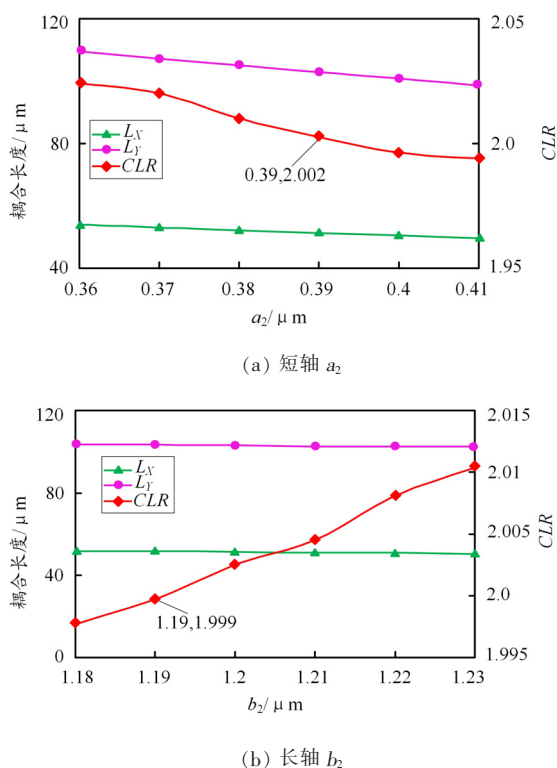


图 6 短轴 a_2 、长轴 b_2 对耦合长度和 CLR 的影响

2.2 耦合长度

通过对结构参数的优化,当 $d=1.0\ \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=1.1\ \mu\text{m}$ 、 $\Lambda_y=2.0\ \mu\text{m}$ 、 $a_1=0.72\ \mu\text{m}$ 、 $b_1=0.59\ \mu\text{m}$ 、 $a_2=0.39\ \mu\text{m}$ 和 $b_2=1.19\ \mu\text{m}$ 时,耦合长度随波长的变化如图 7 所示。可以看出,X、Y 方向的耦合长度都随着波长的增大而减

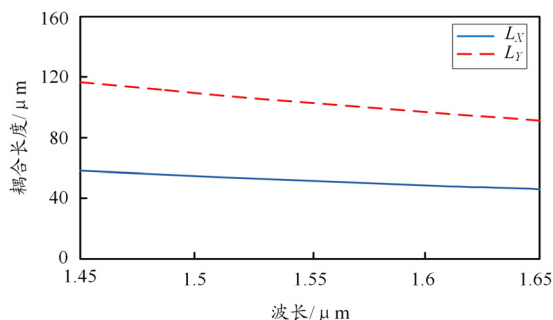


图 7 耦合长度随波长变化曲线

小。这是因为 2 个纤芯之间的耦合作用增强,因此耦合长度就减小,且 Y 方向的耦合长度比 X 方向的耦合长度长,在入射波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处, $L_x=51.53\ \mu\text{m}$ 、 $L_y=103.05\ \mu\text{m}$ 。由式(2)计算可得 CLR 为 1.999,即光在光纤中传输 $103.05\ \mu\text{m}$ 时两束光基本可以实现完全分离。

2.3 消光比

图 8 是偏振分束器在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长附近消光比随波长的变化曲线。可以看出,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处消光比高达 $117.78\ \text{dB}$,消光比大于 $20\ \text{dB}$ 的波长范围为 $1.5\sim 1.6155\ \mu\text{m}$,对应的带宽为 $100\ \text{nm}$,且长度短至 $0.103\ \text{mm}$ 。本文设计的偏振分束器长度短、消光比高(与文献[12,13]相比)和带宽宽(与文献[14,16]相比);在消光比、带宽相差不大的情况下长度短(与文献[15]相比)。

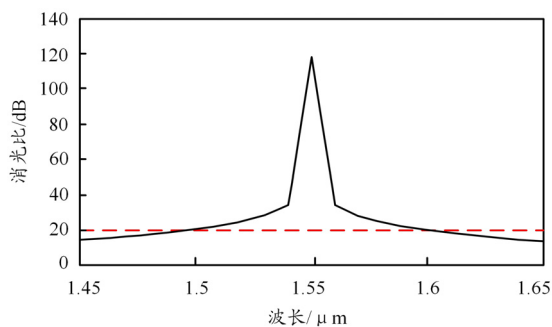


图 8 消光比随波长的变化曲线

3 结束语

本文提出了一种以二氧化硅为背景材料的新型六边形双芯 PCF 偏振分束器,得到了一种高消光比、长度短和带宽宽的偏振分束器。偏振分束器在 $1.550\ \mu\text{m}$ 处的长度为 $103.05\ \mu\text{m}$,消光比为 $117.78\ \text{dB}$,高于 $20\ \text{dB}$ 的带宽为 $100\ \text{nm}$,波长范围为 $1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$,覆盖了整个 C 波段以及 S、L 波段的大部分波段。本文设计的新型结构对设计性能更加优越的偏振分束器有着一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 张明宇,丁明吉,罗青松.下一代光通信网络传送技术概述及其趋势[J].光通信技术,2014,38(8):20-22.
- [2] LEE Y W, HAN K J, LEE B, et al. Polarization independent all fiber multiwavelength-switchable filter based on a polarization-diversity loop configuration[J]. Opt Express, 2003, 11(25): 3359-3364.
- [3] XU Z, LI X, LING W, et al. Design of short polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with ultra-high extinction ratio [J]. Optics Communications, 2015, 354: 314-320.
- [4] FANG L, WANG J. All-fiber polarization beam splitting and rotating

based on vector-mode-assisted coupling [J]. Optics express, 2018, 26(12): 15124–15137.

[5] SNYDER A W, STEVENSON A J. Polished-type couplers acting as polarizing beam splitters[J]. Optics Letters, 1986, 11(4): 254–256.

[6] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P S J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding: errata.[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547–1549.

[7] 张银, 陈明阳, 张永康. 新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 103–108.

[8] CHEN D, WU G. Highly birefringent photonic crystal fiber based on a double-hole unit[J]. Applied optics, 2010, 49(9): 1682–1686.

[9] 闫海峰, 俞重远, 田宏达. 八角光子晶体光纤传输特性与非线性特性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(5): 3273–3277.

[10] 张亚妮. 低损耗低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 261–267.

[11] LIMIN W, PENG S, JING W, et al. A squeezed lattice high negative dispersion and high birefringence photonic crystal fiber [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): 183–187.

[12] 韩博琳, 姜淑琴, 鹿文亮, 等. 新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(24): 165–171.

[13] SHENG Z, WANG J, FENG R. Design of a compact polarization splitter based on the dual-elliptical-core photonic crystal fiber [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 67: 560–565.

[14] 曹晔, 赵舜, 童峥嵘. 基于碲酸盐的新型单芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 50–54.

[15] 李绪友, 许振龙, 刘攀, 等. 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏

振分束器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 193–199.

[16] 刘兆伦, 杜海丽, 汪明. 全固三芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 光子学报, 2016, 45(10): 35–39.

[17] RAJESWARI D, RAJA A S, SELVENDRAN S. Design and analysis of polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber [J]. Optik, 2017, 144: 15–21.

[18] HE F, SHI W, HUI Z, et al. A dual-core PCF polarization splitter with five elliptical air holes based on tellurite glass [J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(11): 363.1–363.10.

[19] JEGADEESAN S, DHAMODARAN M, AZEES M, et al. Design of a Polarization Splitter Based on a Dual-core Hexagonal-shaped Photonic Crystal Fiber[J]. Current Optics and Photonics, 2019, 3(4): 304–310.

[20] 任国斌, 王智, 姜淑琴, 等. 双芯光子晶体光纤中的模式干涉[J]. 物理学报, 2004(8): 2600–2606.

[21] ZHANG S, ZHANG W, GENG P, et al. Design of single-polarization wavelength splitter based on photonic crystal fiber[J]. Applied optics, 2011, 50(36): 6576–6582.

[22] CUCINOTTA A, SELLERI S, VINCETTI L, et al. Perturbation analysis of dispersion properties in photonic crystal fibers through the finite element method [J]. J lightwave Technol. 2002, 20: 1433–1442.

[23] ROSA L, POLI F, FORONI M, et al. Polarization splitter based on a square-lattice photonic crystal fiber[J]. Opt. Lett., 2006, 31(4): 441–443.

[24] LU W, LOU S, WANG X. Ultrabroadband polarization splitter based on a modified three-core photonic crystal fiber[J]. Applied optics, 2013, 52(35): 8494–8500.